

LES EBOULIS GELÉS DU CREUX DU VAN (CHAÎNE DU JURA, SUISSE)

Reynald DELALOYE
Institut de Géographie, Université de Fribourg, CH-1700 Fribourg
E-mail : reynald.delaloye@unifr.ch

Emmanuel REYNARD
Institut de Géographie, Université de Lausanne, BFSH 2, Dorigny, CH-1015 Lausanne
E-mail : Emmanuel.Reynard@igul.unil.ch

Résumé :

« Un pergélisol est enfoui sous les épicéas nains du cirque du Creux du Van, dans le Jura ». Habitué à fréquenter les terrains gelés dans les Alpes, bien au-dessus de la limite de la forêt, cette affirmation nous a laissés quelque peu perplexes. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés au cas du Creux du Van depuis l'automne 1997. Les résultats obtenus ne manquent pas de surprendre. La partie inférieure de la pente d'éboulis prospectée au pied des parois du cirque paraît gelée en permanence sur une épaisseur d'environ 20 mètres. Un système de ventilation complexe de l'éboulis fonctionne dans un sens ou dans l'autre selon la température extérieure de l'air. Il permet notamment à l'éboulis d'abaisser fortement sa température au cours de l'hiver lors des phases météorologiques froides quelle que soit l'épaisseur de la couche de neige. En été, de l'air froid est expulsé à la base de la pente d'éboulis. Cet air, d'autant plus froid que l'air extérieur est chaud, contribue à l'existence d'une végétation adaptée aux milieux frais et humides, végétation qui, à son tour, empêche le sol de se réchauffer durant l'été... Nous sommes ainsi en présence d'un micro-système particulier générant une forte anomalie thermique négative du sol et que nous proposons de dénommer «éboulis froid» (ou gelé, si tel est le cas).

Mots-clés : *Eboulis froid, éboulis gelé, pergélisol, ventilation, Jura*

Introduction et problématique

Lorsque nous débutons nos travaux en 1997, nous savons que la particularité première du fond du cirque du Creux du Van est l'existence localisée d'une végétation typique de l'étage alpin, et en particulier, la présence d'épicéas nains. Les plus intéressantes observations et mesures réalisées à ce jour datent de la fin des années 1950 et sont l'œuvre de J.-L. Richard (1961). Ces données permettent notamment de mettre en évidence les températures très fraîches du sol en été et d'émettre l'hypothèse de la présence d'un pergélisol dans les éboulis. L'existence d'un courant d'air froid sortant des blocs durant l'été avec une température proche de 0°C est aussi connue (Pancza 1988, Gobat 1997). Situé à 1200 m d'altitude, le site se trouve néanmoins 1000 mètres au-dessous de la limite inférieure du pergélisol dans les Alpes (Delaloye et Morand 1998 ; Vonder Mühll et al. 1999). Deux grandes questions sous-tendent dès lors notre recherche :

- Il est évident que **dans le sol règnent des conditions thermiques particulièrement froides, quelle en est la cause** ? Est-ce qu'un micro-climat froid peut générer cette anomalie ? Ou bien est-ce un faible ensoleillement dans le fond du cirque qui doit être envisagé comme facteur explicatif prépondérant (Hoelzle 1994, Hoelzle et Haeberli 1995) ?

- **Un pergélisol existe-t-il vraiment** ? Comment le détecter et quelles en sont ses caractéristiques (étendue, nature, épaisseur...) ? L'hypothèse, parfois envisagée, que des lambeaux du glacier local würmien pourraient encore se trouver enterrés sous les éboulis du Creux du Van (Richard 1961) doit-elle être définitivement rejetée ?

C'est à ces questions que nous allons tenter de répondre dans les pages qui suivent.

1. Description du site

Le Creux du Van (lat. N 46°56', long. E 6°44') est une entaille d'érosion régressive dans le premier anticlinal de la chaîne du Jura (partie interne). Le cirque, en forme de fer à cheval ouvert vers l'E, est profond d'environ 300 m (entre 1150 et 1450 m d'altitude). Il est couronné sur ses flancs méridional, occidental et septentrional par de puissantes barres calcaires (Kimméridgien) atteignant jusqu'à 150 m de hauteur. A leur pied, les barres rocheuses font place à de vastes pentes d'éboulis granoclassées qui reposent sur des marnes imperméables (Argovien). Dans leur partie haute, les talus d'éboulis sont généralement dénudés (absence de sol) et mobiles. Ils comportent ça et là quelques érables. Dans la moitié inférieure, les éboulis, devenus grossiers, sont le plus souvent recouverts d'un sol organique pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur et d'un épais tapis végétal. Les épicéas, amateurs de fraîcheur et d'humidité, prennent le relais des érables. Deux types de pessières sont à distinguer (Buttler 1999) : la Pessière à Asplénium (*Asplenio-Piceetum*) avec ses grands épicéas, la rareté du sous-bois et la présence continue de myrtilles, d'airelles et de mousses ; la Pessière à Tofieldie (*Tofieldio-Piceetum*) marquée par le nanisme des épicéas et de quelques bouleaux et par un couvert quasi continu de mousses et de sphaignes. Cette seconde pessière se développe sur un substrat particulier, un organosol insaturé de type hydromor (Duchaufour 1976, Gobat 1997, Buttler 1999), décrit également, à tort ou à raison, en tant que marais d'eau de condensation (OFEFP 1992 ; voir aussi pour le concept Schaeftlein 1962, Wakonigg 1996). A priori, la Pessière à Tofieldie est établie sur un pergélisol sous-jacent. Au bas des pentes, les éboulis font place à des dépôts morainiques qui reposent eux aussi sur les marnes argoviennes et où se développe une hêtraie à sapins.

Trois secteurs principaux à épicéas nains apparaissent au pied des parois S et W. C'est dans l'une de ces « clairières » (la plus à l'E, apparemment la moins ensoleillée car orientée vers le N, et surtout la plus pratique d'accès) que se concentrent nos investigations (fig. 1).

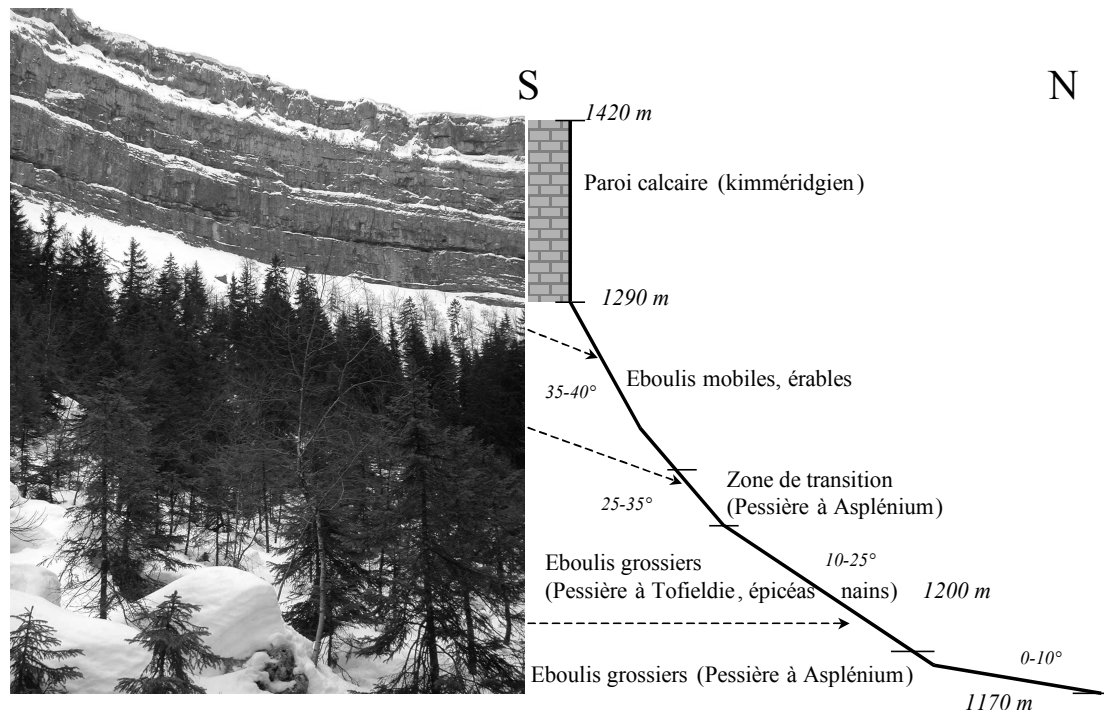


Fig.1 : Aperçu du site d'étude du Creux du Van et schéma descriptif des éboulis.
Photo : C. Lambiel, février 2001.

2. Température de l'air

L'existence d'un sol froid peut-elle être la conséquence d'un micro-climat froid ? Pour répondre à cette première question, nous avons installé une station automatique d'acquisition de donnée (MADD) au milieu des épicéas nains (1200 m.s.m). La température de l'air est mesurée à 2 m du sol à une fréquence horaire (tabl. 1). La température annuelle moyenne est de + 5.5°C (période 1998-2000), ce qui est normal pour cette altitude (comparer par exemple avec Hoelzle (1994) qui a estimé la température moyenne annuelle de l'air au Creux du Van sur la base de stations environnantes). L'hiver n'est pas froid, avec une température moyenne légèrement inférieure à 0°C. Les valeurs inférieures à -10°C sont plutôt rares. Les mois de mai à septembre ont tous des températures moyennes supérieures à +10°C. Les maxima sont relativement fréquents au-dessus de +25°C. Un micro-climat froid n'existe ainsi pas au Creux du Van et ne peut être la cause de l'anomalie thermique négative du sol.

Tabl. 1 : Température de l'air au Creux du Van (station MADD, 1200 m.s.m)

	Température moyenne				Valeur horaire minimale				Valeur horaire maximale			
	1997	1998	1999	2000	1997	1998	1999	2000	1997	1998	1999	2000
Janv.		-1.4	-0.3	-2.5		-10.1	-13.6	-15.9		8.1	9.5	5.8
Fév.		1.4	-4.8	0.0		-8.3	-19.0	-9.8		9.6	2.4	7.6
Mars		0.9	-0.3	0.7		-8.7	-8.6	-10.2		12.1	4.7	8.2
Avr.		3.1	2.3	3.9		-5.4	-5.9	-4.9		15.6	11.0	18.2
Mai		10.1	10.6	10.3		0.1	3.6	2.2		23.5	25.8	23.1
Juin		12.7	11.0	13.5		1.1	3.4	4.2		28.8	26.1	26.5
Juil.		14.2	14.7	11.5		6.1	5.2	4.0		30.1	28.7	26.9
Août		14.0	13.6	14.3		2.7	7.4	8.0		29.6	24.2	26.0
Sept.		9.0	12.0	10.5		0.6	6.1	4.5		21.7	19.5	19.0
Oct.		5.4	6.1	6.4		0.1	-0.4	-0.2		13.3	16.1	14.1
Nov.	2.6	-1.5	-0.4	1.4	-4.4	-12.0	-10.4	-4.3	12.2	11.7	12.3	9.5
Déc.	-0.8	-0.9	-1.3	1.6	-9.9	-9.6	-10.6	-8.6	7.3	8.5	6.1	9.7
Année		5.6	5.3	5.8								

3. Rayonnement solaire

Est-ce qu'une réduction du rayonnement solaire due à la présence de hautes parois calcaires pourrait expliquer le refroidissement important des éboulis du Creux du Van ? Cette hypothèse a été notamment formulée par Funk et Hoelzle (1992).

Un pyranomètre installé sur la station MADD fournit les données de rayonnement solaire global (direct + diffus) incident (tabl. 2). La station demeure dans l'ombre du 8 septembre au 30 mars, soit pendant près de 7 mois. Pendant cette longue période, seul le rayonnement diffus atteint le site. Tenant compte du fait que la neige renvoie 80 à 90% (albédo) du rayonnement solaire, l'énergie fournie au sol par rayonnement solaire entre septembre et mars est extrêmement faible. Au solstice d'été, la station enregistre 10 heures d'ensoleillement et des maxima d'environ 900 W/m² (fig. 2). Un mois plus tard (ou plus tôt, c'est identique), à fin juillet ou à mi-mai, la durée d'insolation est encore de 7 heures. Le passage entre la période « d'ensoleillement » et celle « d'ombre permanente » est relativement brutal : 4 heures de soleil au moins le 22 août, 2 heures encore le 2 septembre, plus rien le 8 septembre. Le procédé est évidemment symétriquement opposé au printemps. De la fin avril au début août, l'ensoleillement est donc potentiellement important; la perte d'énergie solaire provoquée par l'horizon élevé devient négligeable. En raison de la topographie du terrain - la paroi est au S - la partie basse de l'éboulis où se trouve la station MADD et les épicéas nains est la partie la mieux ensoleillée de toute la pente. Plus on remonte vers la paroi, plus la durée d'exposition diminue. L'ombre devient quasi permanente à son pied.

Tabl. 2 : Rayonnement solaire global incident sur surface horizontale (Creux du Van - station MADD).
Période 1998-2000.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
MJ/m ² /jour	0.8	1.0	2.4	6.8	12.2	15.8	14.2	9.6	4.6	2.5	1.0	0.7	6.0
% annuel	1	1	3	9	17	22	20	13	6	4	1	1	

Les données discutées jusqu'ici concernent le rayonnement solaire incident à 2 mètres au-dessus du sol sur une surface horizontale. Au niveau du sol, deux facteurs entrent en ligne de compte et contribuent à diminuer l'intensité du rayonnement solaire : (a) l'inclinaison et l'orientation du versant et (b) la végétation. Durant l'été, l'intensité du rayonnement solaire direct sur la pente d'éboulis est diminuée d'environ 30 % par rapport à une surface horizontale en raison de l'augmentation de l'angle d'incidence. Cette estimation est réalisée sur la base de valeurs proposées par Lecarpentier (1974, cité par Hufty et Theriault 1983). En septembre 1999, un second pyranomètre a été installé à la surface du sol dans le but de connaître la quantité de rayonnement solaire qui atteint réellement le sol après filtrage par la strate arbustive. La figure 3 illustre les résultats obtenus entre fin avril et début mai 2000. Après la disparition de la neige, la perte d'énergie due à l'absorption et à la réflexion du rayonnement solaire par la végétation est de l'ordre de 60 à 70 % lors des journées de beau temps.

On retiendra ici que les épicéas nains occupent paradoxalement les zones les mieux ensoleillées des pentes d'éboulis et que si le sol n'est effectivement soumis qu'à un faible ensoleillement, ce n'est pas l'ombre portée par les parois qui en est la cause majeure, mais l'absorption et la réflexion du rayonnement solaire par la strate arbustive.

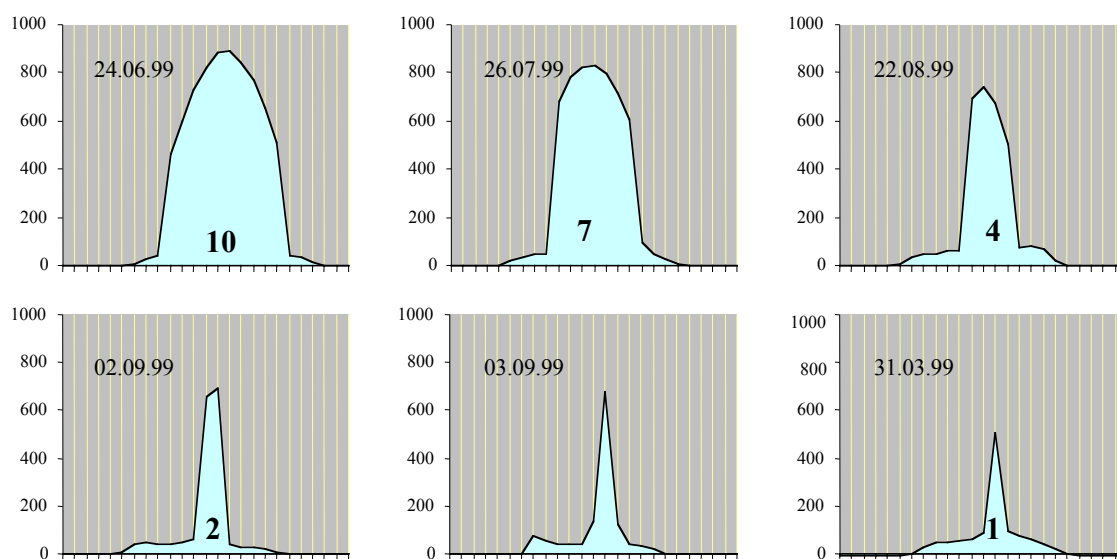


Fig. 2 : Rayonnement solaire global incident (W/m²) au Creux du Van (station MADD) : quelques exemples par beau temps. Les chiffres indiquent le nombre d'heure(s) d'ensoleillement.

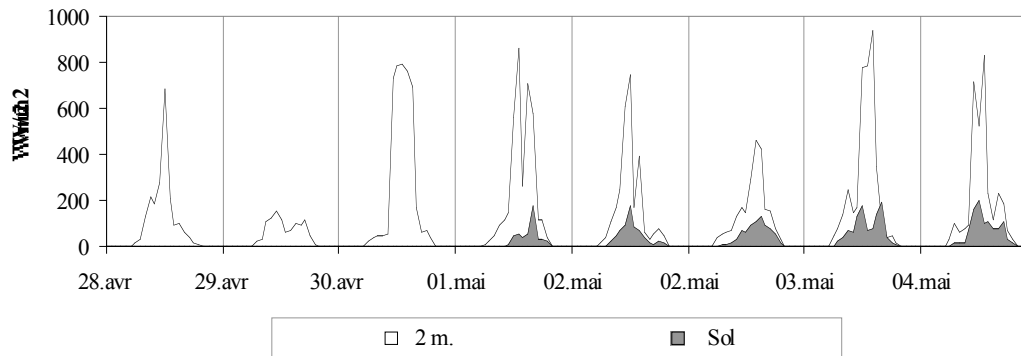


Fig. 3 : Rayonnement solaire incident à 2 m du sol (au-dessus des épicéas nains) et à la surface du sol dans la Pessière à Tofieldie (station MADD). Extrait pour la période 28 avril – 4 mai 2000. Disparition du manteau neigeux le matin du 1er mai.

4. Température du sol dans la Pessière à Tofieldie (épicéas nains)

La mesure de la température du sol proche de la surface peut servir à déterminer l'existence de pergélisol (Hoelzle et al. 1999). Au coeur de l'hiver (février), lorsque le manteau neigeux est bien épais et qu'il isole le sol des fluctuations thermiques extérieures, la température de la surface du sol se stabilise à un niveau qui est utilisé comme indice de la présence (si $< -2^{\circ}\text{C}$) ou de l'absence (si proche de 0°C) de pergélisol. Il s'agit du principe de la méthode BTS (Bottom Temperature of the winter Snowcover) développée par Haeberli (1973) et fréquemment utilisée en haute montagne.

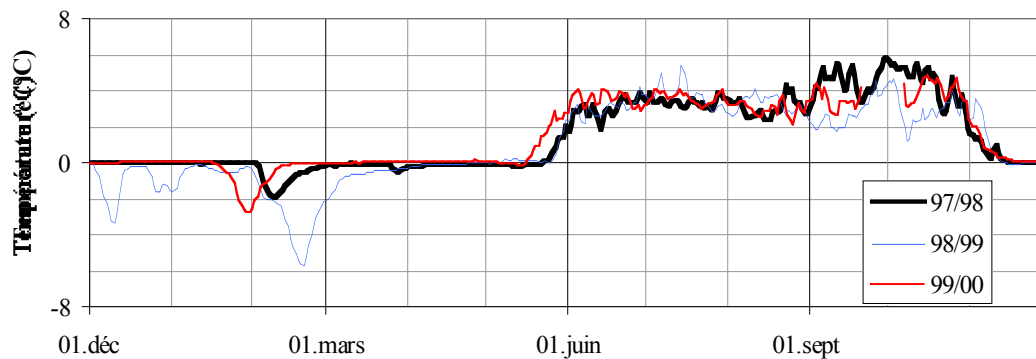


Fig. 4 : Comportement thermique du sol (moyennes journalières), à 30 cm de profondeur, dans la zone des épicéas nains (station MADD).

C'est avant tout à cette méthode BTS que nous pensions, lorsque nous avons installé un capteur de la station MADD à 30 cm de profondeur dans l'organosol. Les données relevées (fig. 4) ne nous ont pas permis d'utiliser la clé d'interprétation de la méthode BTS, mais nous ont fourni de nouvelles sources d'interrogation.

(a) Des « pics de froid » apparaissent une ou plusieurs fois pendant l'hiver (jusqu'à -5.6°C en février 1999). Que signifient-ils ? Quelle est leur origine ? Nous savons qu'ils interviennent à la suite de périodes de quelques jours où la température de l'air demeure particulièrement basse (inférieure à -5°C).

(b) La température est fraîche ($< +4.5^{\circ}\text{C}$), avec très peu de variations, durant les mois de juin, juillet et août. La température du sol a de plus tendance à s'abaisser lorsque la température de l'air s'élève, que ce soit à l'échelle de la journée ou de l'intégralité de la période (fig. 5).

(c) Les maxima ($> +5^{\circ}\text{C}$) sont enregistrés généralement entre septembre et octobre, c'est-à-dire pendant une période durant laquelle le soleil n'arrive déjà plus à atteindre le site.

(d) La température moyenne annuelle du sol est de $+1.3^{\circ}\text{C}$ (période 1998-2000). Cette valeur est positive, mais elle n'empêche pas la présence d'un pergélisol, qui plus est en équilibre avec les conditions climatiques et environnementales en vigueur (voir p.ex. Burn et Smith 1988, Smith et Riseborough 1996).

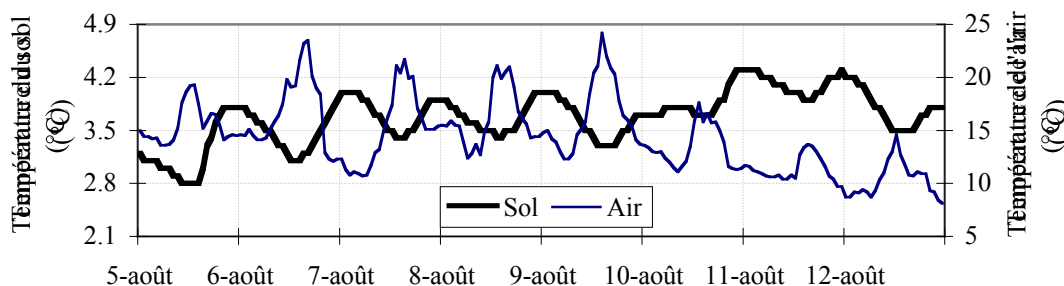


Fig. 5 : Comportements thermiques du sol (30 cm de profondeur) et de l'air durant l'été. Exemple relevé à la station MADD entre le 5 et le 12 août 1999. Remarquer l'inversion journalière du rythme thermique du sol (minima le jour, maxima la nuit), de même que l'inversion de la tendance sur l'ensemble de la période illustrée (augmentation de la température du sol alors que la température de l'air baisse).

Intéressons-nous à la question des températures de l'été, à leur permanente fraîcheur et leur faible variabilité. Quel est le rôle du courant d'air froid qui sort des blocs, qui est facilement observable dès la fin mai (il suffit de s'en approcher) et qui semble disparaître ensuite au cours de l'automne. Au début juillet 2000, un capteur thermique a été placé dans l'un des nombreux chenaux de ventilation repérés à proximité de la station MADD. Les résultats montrent qu'entre juillet et août 2000, la température se situe invariablement entre $+0.1^{\circ}\text{C}$ et $+1.8^{\circ}\text{C}$, à l'exception de quelques périodes pluvieuses où la température s'élève quelque peu. Une corrélation inverse parfaite existe avec la température de l'air dont 7°C d'augmentation génèrent un abaissement de 1°C de la température de l'air expulsé du sol (en termes de moyenne journalière, fig. 6). Des mesures sont en cours sur un site similaire afin de mesurer la vitesse de ce courant d'air, elle aussi probablement fonction du gradient thermique entre l'air et le sous-sol (Gude, comm. pers.). Le processus de ventilation s'atténue ensuite fortement au début septembre (la station est malheureusement tombée en panne à ce moment). Cette période correspond avec la disparition définitive du soleil derrière les parois du cirque ! Durant le mois d'octobre 2000, la température de l'air dans le canal a été similaire à la température mesurée dans l'organosol (entre $+3$ et $+5^{\circ}\text{C}$).

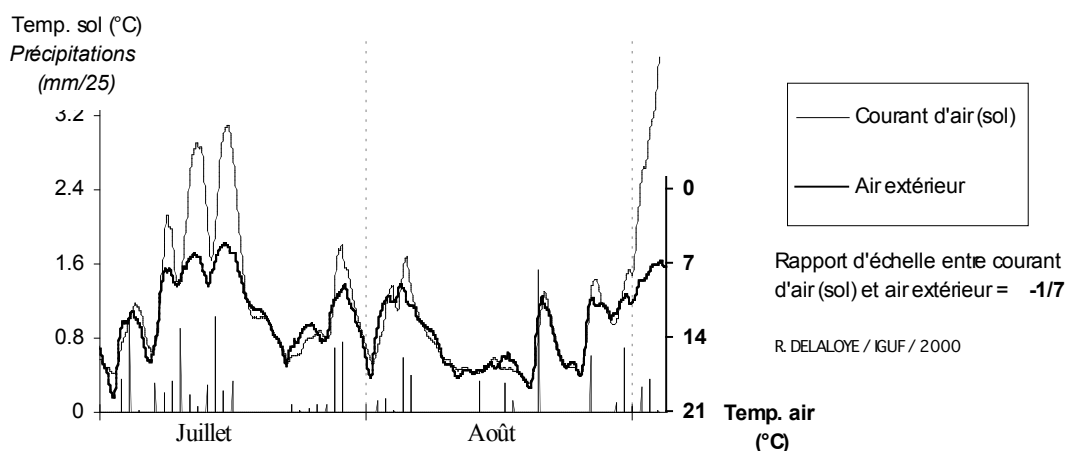


Fig. 6 : Valeurs journalières moyennes de la température de l'air extérieur, des précipitations et de la température de l'air expulsé dans la partie basse de l'éboulis du 1er juillet au 3 septembre 2000. L'échelle pour la température de l'air (à droite) est inversée.

Ces observations nous permettent d'envisager l'existence de glace (intersticielle) dans le sous-sol et, par conséquent, d'une réserve importante de « frigories » (chaleur latente nécessaire à la fonte de glace). Une porosité efficace suffisante au travers de tout l'éboulis, en particulier en profondeur dans la zone potentiellement gelée, permet la circulation d'air.

5. Mesures nivologiques

Comment expliquer maintenant les « pics de froid » hivernaux subis par le sol dans la Pessière à Tofieldie ? Pour y voir plus clair, nous avons installé à l'automne 1998 un « mât à neige », i.e. un mât sur lequel sont répartis à intervalles réguliers 6 capteurs de température (mini-datalogger de type UTL-1, Krummenacher 1997). Par ce moyen, nous pouvons ainsi connaître en même temps l'épaisseur approximative de neige (la variabilité thermique journalière est immédiatement atténuée lorsque le capteur est sous la neige) et la température à l'intérieure de la couche de neige. L'objectif est de comprendre les échanges thermiques entre le sol et l'air durant l'hiver.

L'exemple le plus frappant est celui de l'hiver 1998/99 (figure 7). A mi-février, la couverture neigeuse atteint plus de 180 cm d'épaisseur, et à ce moment-là perdurent pendant plusieurs jours des températures de l'air très froides (jusqu'à -19°C). La vague de froid se transmet aisément à travers toute la couche de neige (ce qui est surprenant du fait de la mauvaise conductivité thermique de la neige), puis pénètre tout aussi aisément dans le sol. Le capteur situé à 30 cm de profondeur dans l'organosol enregistre une température minimale de -5.6°C ! Nous en tirons comme conclusions : (1) le sol était déjà gelé avant l'arrivée de la « vague » de froid (dans le cas contraire, l'onde de froid aurait été entièrement absorbée par la libération de chaleur latente liée à la transformation de l'humidité du sol en glace) ; (2) deux mètres de neige n'ont pas suffi à isoler le sol, pourquoi ?

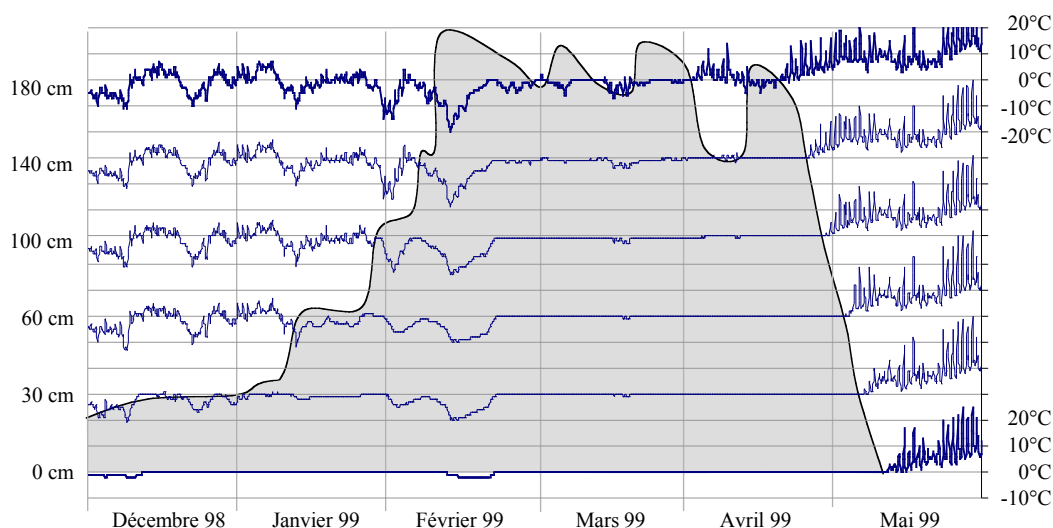


Fig. 7 : Evolution de la couverture de neige durant l'hiver 1998/99 près de la station MADD. L'épaisseur de neige (surface grise) est estimée à partir des variations de température mesurées par des mini-dataloggers (UTL-1) répartis à différentes hauteurs sur un mât. Echelle de température uniquement représentée pour les niveaux 0 et 180 cm. Remarquer la pénétration aisée jusqu'au sol de la vague de froid de mi-février.

6. Température du sol autour de la Pessière à Tofieldie

Quel est le comportement thermique du sol autour de la zone des épicéas nains ? Nous avons pour cela disposé durant l'hiver 1997/98 une dizaine de mini-datalogger (UTL-1) aux environs de la « clairière ». Trois types de comportement résument ce que nous avons pu observer (fig. 8).

(a) Aux limites de la zone d'épicéas nains, les « pics de froid » hivernaux ont disparu, la température est exactement égale à 0°C durant l'intégralité de l'hiver (l'isolation de la neige fonctionne ici parfaitement). La température estivale du sol (juillet – août) est encore fraîche, mais s'élève approximativement à +7°C.

(b) Dans la Pessière à Asplénium, les deux premiers mois de l'hiver sont nécessaires pour que la température s'abaisse à 0°C, niveau qu'elle ne quittera plus jusqu'à la fin de la fonte de la neige, au début du mois de mai. En juillet-août, la température avoisine les +9°C, une valeur apparemment élevée, mais encore 5°C inférieure à celle de l'air en cette saison.

(c) Dans la partie supérieure de l'éboulis (érablaie), la température du sol est à peu de chose près la même que celle de l'air durant l'été. Tout au long de l'hiver, la température est étonnamment largement supérieure à 0°C, sauf en quelques rares exceptions (10 et 11 janvier par exemple, alors que la température moyenne de l'air durant ces deux journées est de +5.5°C ! Nous concluons que la neige fond abondamment, de l'eau à 0°C s'écoule, le sol se refroidit). Du 25 janvier au 4 février, la température moyenne de l'air est de -7°C. Durant cette période froide, la température du sol est de +3°C et demeure stable. Pendant ce temps-là, dans la partie basse de l'éboulis, la température du sol subit la vague de froid et la température s'abaisse au-dessous de -2°C (cf. fig. 4) !

Une circulation d'air au travers de l'éboulis tout entier peut expliquer ces observations. L'air contenu dans la partie supérieure de l'éboulis, plus chaud et plus léger que l'air extérieur, a tendance à s'élever et à s'échapper. Ce phénomène contribue tout d'abord à maintenir une température élevée dans le sol de l'érablaie et d'autre part, il conduit à une aspiration d'air depuis la base de l'éboulis. Ce processus est d'autant plus efficace que l'air extérieur est froid. Ceci permet également d'expliquer les « pics de froid » observés dans la partie basse de l'éboulis : de l'air froid est aspiré dans le sol au travers de la couche de neige !

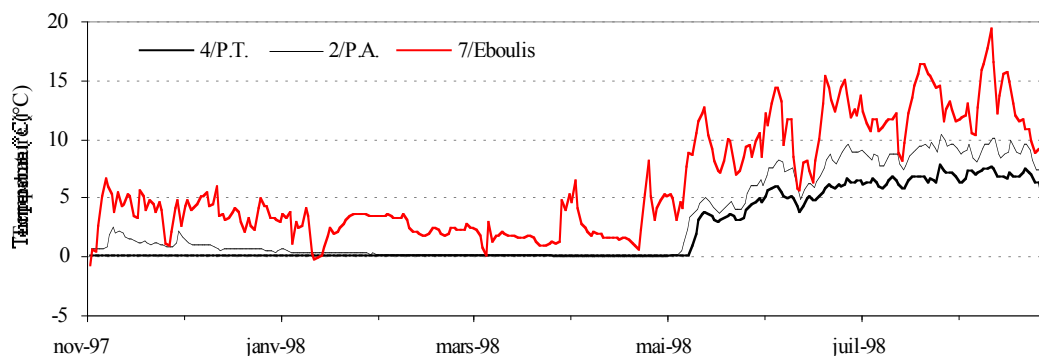


Fig. 8 : Autres comportements thermiques typiques du sol dans les pentes d'éboulis du Creux du Van (période 1er nov. 1997 – 31 août 1998). "4/P.T." a été relevé à la limite inférieure de la Pessière à Tofieldie (épicéas nains); "2/P.A." correspond à la Pessière à Asplénium située en aval de la "clairière" d'épicéas nains; "7/Eboulis" a été mesuré dans la partie médiane de la pente d'éboulis, à la limite inférieure de l'érablaie.

7. Géoélectrique

Voilà pour le fonctionnement thermique du sol ! Mais qu'en est-il du pergélisol ? La glace est un matériau particulièrement résistant au courant électrique, ce qui fait de la géoélectrique une méthode appropriée et fréquemment utilisée pour la prospection du pergélisol. Diverses techniques peuvent être

utilisées. Les données présentées ici sont le résultats des sondages verticaux (configuration dissymétrique de Hummel) effectués de manière identique à celle décrite par Vonder Muehl (1993) ou Reynard et al. (1999). Le but d'un sondage géoélectrique est de détecter à partir de la surface des couches du sous-sol aux résistivités spécifiques différentes. Il est également possible d'estimer l'épaisseur de ces couches. Trois sondages ont été réalisés. Le premier (CV1) dans la hêtraie à sapins sise au fond du cirque (alt. 1160 m), le second (CV2) à l'emplacement de la station MADD (alt. 1200 m), le dernier (CV3), plus haut dans l'éboulis, à la limite supérieure de la « clairière » d'épicéas nains (alt. 1250 m), où commence l'érablaie.

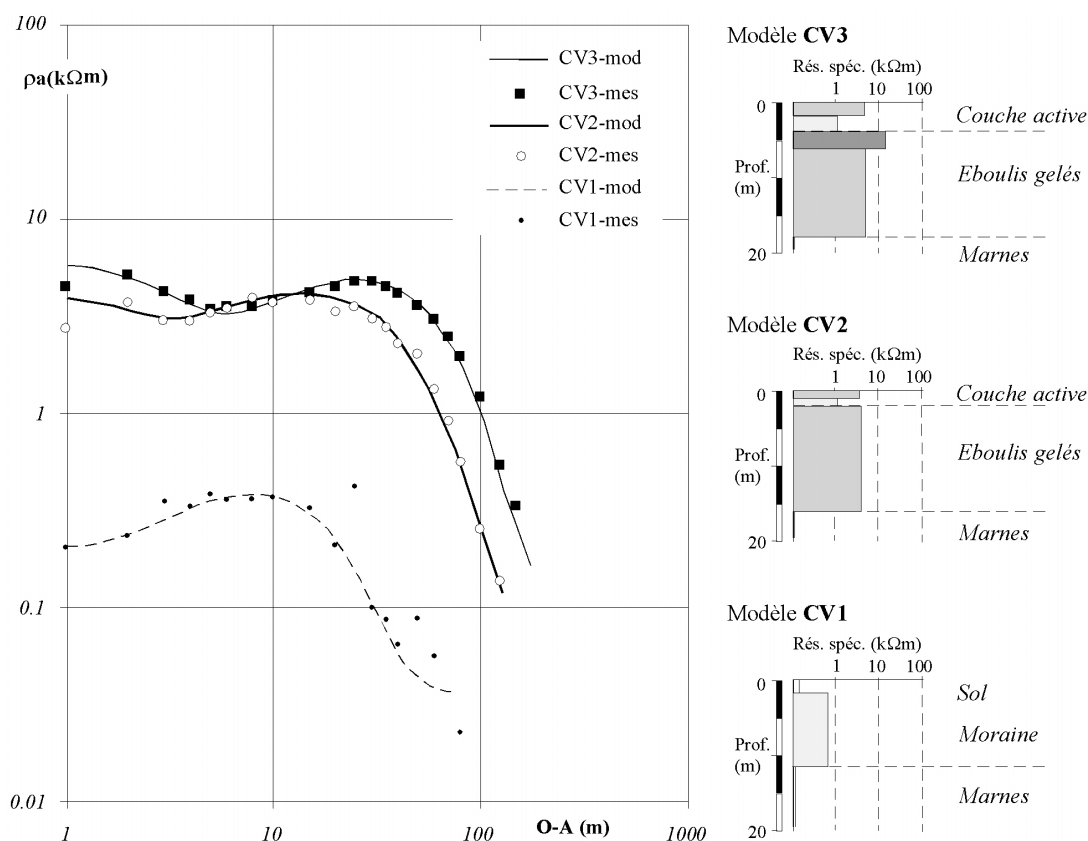


Fig. 9 : Sondages électriques verticaux réalisés le 21 octobre 1998. Les résistivités apparentes (ρ_a) mesurées sont indiquées par les ensembles de points CVx-mes. Les courbes CVx-mod représentent les valeurs de résistivité apparente calculées sur la base des modèles proposés à droite. Localisation des sondages : CV1 = hêtraie-sapinière, CV2 = épicéas nains, CV3 = limite inférieure érablaie.

Les sondages sont reproduits sur la figure 9, mais nous présentons d'abord quelques clés permettant la lecture du graphique et l'interprétation des résultats. L'axe des ordonnées représente les valeurs de résistivité apparente mesurées (la résistivité apparente est une combinaison des résistivités spécifiques des diverses couches rencontrées par le courant électrique pénétrant dans le sol). L'axe des abscisses indique la demi-distance (indiquée OA sur la fig. 9) entre les deux électrodes (A et B) où est injecté le courant électrique ; plus l'écartement AB est élevé, plus la profondeur atteinte par le courant est grande (estimation : env. $\frac{1}{4}$ de AB). En cas de pergélisol, la résistivité est généralement plus élevée à quelques mètres de profondeur (la zone gelée) que proche de la surface (couche active dégelée lors des mesures), par conséquent la courbe du sondage doit prendre une forme de cloche (parfois fortement aplatie, dissymétrique et déformée) (Delaloye et Devaud 2000). On envisage le plus souvent la présence de glace à partir de 5 $k\Omega m$ (Haeberli et Vonder Muehl 1996), mais il semble possible d'en rencontrer dès 2 $k\Omega m$ selon la nature du sédiment ou lorsque la température du sol gelé est très proche du point de fusion ($0^\circ C$).

Selon nos sondages et l'interprétation que nous proposons, un pergélisol existe au Creux du Van. Son épaisseur est estimée à une vingtaine de mètres (ordre de grandeur similaire aux observations de Kneisel et al. (2000) dans les Alpes grisonnes). Au-dessous d'une couche active de 2 à 3 mètres (estimation concordante avec les mesures de température effectuées par Richard (1961), mais par contre pas avec celles de Pancza (1988)), dont la résistivité moyenne est 3-4 k Ω m, on trouve localement (CV3) un niveau bien gelé de 2 m d'épaisseur environ (résistivité 15-20 k Ω m). Au-dessous (CV3) ou ailleurs (CV2), apparaît un corps gelé « chaud », dont la température est probablement égale à 0°C (résistivité : 5-6 k Ω m). Au-dessous, se trouvent les marnes argoviennes. Il n'y a pas de glace massive (reliquat d'une époque glaciaire par exemple) dans le pergélisol du Creux du Van. La faible épaisseur de la couche active indique que ce pergélisol est actif (c'est-à-dire que la couche active regèle entièrement durant l'hiver).

A la limite entre la pessière et l'érablaie, le sondage CV3 a montré que le corps gelé est toujours présent et que sa résistivité a même quelque peu augmenté. L'épaisseur de la couche active y est plus grande que dans la zone des épicéas nains (CV2).

Un profil de pseudo-section (ou tomographie) électrique (Marescot et al., *en prép.* ; pour la méthode voir aussi Vonder Muehl et al. 2001, Hauck 2001) de 300 m de longueur (du pied de la paroi jusqu'à la hêtraie à sapins) nous permet de confirmer les résultats des sondages verticaux, en particulier l'épaisseur du corps gelé résistant (env. 20 m). Le profil démontre de plus la continuité de ce corps gelé depuis la base de la pente d'éboulis (dans la Pessière à Asplénium) jusqu'à la limite inférieure de l'érablaie au moins, c'est-à-dire dans les deux cas au-delà de la stricte forêt à épicéas nains. L'épaisseur de la couche active est toutefois plus faible dans la Pessière à Tofieldie.

8. Conclusion et perspectives

Les éboulis du Creux du Van abritent donc un sol gelé en permanence d'ampleur relativement importante, conséquence d'une anomalie thermique du sol plus complexe qu'il n'y paraissait à première vue. L'épaisseur du pergélisol est estimée à une vingtaine de mètres et son extension spatiale ne se limite pas aux zones à épicéas nains. La température du pergélisol doit être très proche du point de fusion de la glace, ce qui est indiqué par des résistivités électriques assez faibles. Ces dernières nous permettent par ailleurs d'affirmer qu'il n'y a pas de lambeaux de glace massive résultant de l'enfouissement de reste du glacier würmien dans la zone investiguée.

Contrairement à une idée reçue, le Creux du Van n'est pas un site subissant un micro-climat froid et ne bénéficiant que d'un ensoleillement réduit. Le moteur du refroidissement de l'éboulis est un système de ventilation pouvant s'inverser en fonction du gradient thermique entre l'air et le sol. Cette ventilation a été clairement observée et, dans les grandes lignes, correspond aux descriptions reportées notamment par Lambert (1967) ou Wakonnig (1996). A nos yeux, l'aspiration d'air très froid à l'intérieur de l'éboulis, un processus qui fonctionne même en présence d'un très épais couvert de neige, est une cause essentielle de l'anomalie thermique négative de la partie basse de l'éboulis. En été, le rejet, par gravité, de l'air froid créé à l'intérieur de l'éboulis, maintient en permanence une température du sol très fraîche et freine de ce fait la croissance de la végétation, une végétation qui à son tour empêche le réchauffement du sol (les mousses isolent et les épicéas retiennent le rayonnement solaire).

Les sites, comme celui du Creux du Van, où se mettent en place des processus générant un refroidissement important, voire le gel, d'une pente d'éboulis sont beaucoup plus fréquents que ce que nous avons imaginé en débutant nos travaux en 1997 (Funk et Hoelzle 1992 ; Bertinelli et al. 1993 ; Wegmann 1995 ; Wakonnig 1996 ; Kneisel et al. 2000 ; Gude et al. 2001 ; Sawada et Ono 2001 ; Lambiel, comm. pers. ; Rovera, comm. pers.). Des différences notoires, mais aussi des similitudes frappantes, existent entre les divers sites décrits. Comme plusieurs auteurs, nous proposons d'attribuer le terme d'« éboulis froid » ou d'« éboulis gelé » à ce genre de terrain où peut être démontrée une anomalie thermique importante du sol générée par un système de ventilation.

Cette étude a permis de répondre à quelques questions. Beaucoup restent toutefois ouvertes, notamment en ce qui concerne les relations réciproques entre le régime thermique du sol, la couverture pédologique, la végétation et le comportement du corps gelé. Nos investigations vont donc se poursuivre

afin d'affiner la compréhension des processus en action. Elles vont également s'étendre à d'autres sites a priori comparables. Une approche pluridisciplinaire (pédologie, dendrochronologie, botanique, géomorphologie...) est également envisagée dans le but de reconstruire la mise en place du système actuellement observé ainsi que son évolution récente. Il s'agira notamment de cerner les interactions entre la végétation et le fonctionnement thermique de l'éboulis.

Remerciements

Nous remercions infiniment toutes les personnes qui ont une fois ou l'autre participé à notre étude passionnante des éboulis gelés du Creux du Van : Michelle Bollschweiler, Gaston Clivaz, Grégoire Devaud, Jonathan Dorthe, Xavier Frainier, Viviane Froidevaux, Nathalie Gigon, Jean-Michel Gobat, Patricia Jungo, Franziska Keller, Christophe Lambiel, Ralph Lugon, Marc Lüscher, Laurent Marescot, Sébastien Métrailler, Michel Monbaron, Régis Monnet, Jean-Michel Oberson, Dario Pedrazzini, Marcia Philipps, Gilles Pierrehumbert, David Raemy, Dominique Schneuwly, Veronika Stoeckli, Markus Stoffel et Alain Turatti. Nos remerciements vont également au Service des forêts du Canton de Neuchâtel qui nous a accordé l'autorisation d'accéder au site et d'y mener nos recherches.

Bibliographie

- BERTINELLI F., PETITCOLAS V., ASTA J., RICHARD L. et SOUCHIER B., 1993 : Dynamic relations between vegetation and soil on cold scree in Southern French Alps (relations dynamiques entre la végétation et le sol sur éboulis froid dans les Alpes françaises méridionales). *Revue d'Ecologie Alpine*, II, pp. 93-104.
- BURN C.R. et SMITH C.A.S., 1988 : Observations of the « Thermal Offset » in Near-Surface Mean Annual Ground Temperatures at Several Sites near Mayo, Yukon Territory, Canada. *Arctic*, 41/2, 99-104.
- BUTTLER A., 1999 : La couverture végétale du Creux du Van. In : *Nature au Creux du Van*, Editions du Club Jurassien, 107-142.
- DEALOYE R. et DEVAUD G., 2000 : La distribution du pergélisol dans les marges proglaciaires des glaciers de Challand, d'Aget et du Sanetschhorn (Valais, Alpes suisses). In HEGG C. & D. VONDER MÜHLL (Hrsg). *Beiträge zur Geomorphologie. Proceedings der Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, 8-10. Juli 1999 in Bramois (VS)*, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 87-96.
- DEALOYE R. et MORAND S., 1998 : Les glaciers rocheux de la région d'Entremont (Alpes Valaisannes): inventaire et analyse spatiale à l'aide d'un SIG. In *Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 158, ETH-Zürich, 75-86.
- DUCHAUFOR P., 1976 : *Atlas écologique des sols du monde*. Ed. Masson. Paris.
- FUNK M. et HOELZLE M., 1992. Application of a potential direct solar radiation model for investigating occurrences of mountain permafrost. *Permafrost and Perigl. Process.* 3, p. 139-142.
- GOBAT J.-M., 1997 : Sols et végétation du Jura: entre Méditerranée et toundra scandinave. In: *Paysages calcaires de l'arc jurassien: du minéral au vivant*, Cahiers du Musée d'Histoire Naturelle, La Chaux-de-Fonds, 7, p. 35-58
- GUDE M., DIETRICH S., MÄUSBACHER R. et MOLENDI R., 2001: Exceptionally cold microclimatic conditions in blocky scree slopes in Central Europe. *First European Permafrost Conference*, Rome 2001, Abstract volume, p.33.
- HAEUBERLI W. et VONDER MÜHLL D., 1996 : On the characteristics and possible origins of ice in rock glacier permafrost. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., 104, 43-57.
- HAEUBERLI W., 1973 : Die Basistemperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* XI (1-2) : 221-227.
- HAUCK C., 2001 : Geophysical methods for detecting permafrost in high mountains. *Eidg. Tech. Hochschule, Zürich. Versuchsanst. Wasserbau. Hydrol., Glaziol. Mitt.* 171.

- HOELZLE M. et HAEBERLI, W., 1995 : Simulating the effects of mean annual air-temperature changes on permafrost distribution and glacier size: an example from the upper Engadin, Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 21, p. 399-405.
- HOELZLE M., 1994 : Permafrost und Gletscher im Oberengadin : Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren. *Eidg. Tech. Hochschule, Zürich. Versuchsanst. Wasserbau. Hydrol., Glaziol. Mitt.* 132.
- HOELZLE M., WEGMANN M. et KRUMMENACHER B., 1999 : Miniature Temperature Dataloggers for Mapping and Monitoring of Permafrost in High Mountain Areas : First Experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 10, 113-124.
- HUFTY A. et THERIAULT M., 1983 : Atlas d'abaques pour le calcul du rayonnement solaire par beau temps. *Notes et documents de recherche*, 18, Labor. de Climatologie, Deptmt Géogr., Université de Laval, Québec.
- KNEISEL C., HAUCK C., VONDER MÜHLL D., 2000 : Permafrost below the Timberline Confirmed and Characterized by Geoelectrical Resistivity Measurements, Bever Valley, Eastern Swiss Alps. *Permafrost Perigl. Process.*, 11 : 295-304.
- KRUMMENACHER B., 1997 : Mini - Temperatur-Datalogger UTL-1 In: Vonder Mühl D. (Hrsg.) : *Aktuelle Beiträge laufender Projekte zum Thema Permafrost*, Report zum Treffen der SANW-Koordinationsgruppe Permafrost, Zürich, 29. April 1996, Arbeitsheft VAW ETH Zürich, 19, pp. 10-13.
- LAMBERT A. 1967 : La formation de glace dans les conduits karstiques, les roches fissurées et les pierriers. *Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique* (2), IX, 4, pp. 321-324.
- MARESCOT L., HOKE M.L., BARON L., CHAPELLIER D., DELALOYE R., LAMBIEL C., MONNET R. et REYNARD E. (*in prep.*) : Assessing reliability of 2D resistivity imaging in permafrost and rock glacier studies using the DOI (depth of investigation) index method. *European Journal of Environmental & Engineering Geophysics EEGS* (European section, Environmental and Engineering Geophysical Society).
- OFEFP, 1992 : *Conservation des marais en Suisse* : manuel. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Berne.
- PANCZA A., 1989 : Un pergélisol actuel dans le Jura Neuchâtelois. *Bulletin de la Société Neuchâteloise de Géographie* 32/33 :129-140.
- REYNARD E., DELALOYE R. et LAMBIEL C., 1999 : Prospection géoélectrique du pergélisol alpin dans le massif des Diablerets (VD) et au Mont-Gelé (Nendaz, VS), *Bull. de la Murithienne* 117, 89-103.
- RICHARD J.-L., 1961 : Les forêts acidophiles de résineux. In : *Les forêts acidophiles du Jura*, Commission phytogéographique de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Editions Hans Huber, Berne.
- SAWADA Y. et ONO Y., 2001 : Mechanism of sporadic permafrost preservation in the blocky slope at Mt. Nishi-Nupukaushinupuri, Ccentral Hokkaido, Japan. *First European Permafrost Conference*, Rome 2001, Abstract volume, p.40.
- SCHAEFTLEIN H., 1962 : Ein eigenartiges Hochmoor in den Schladminger Tauern. *Mitt. Naturwissen. Ver. Steiermark* 92, 104-119.
- SMITH M.W. et RISEBOROUGH D.W., 1996 : Permafrost Monitoring and Detection of Climate Change. *Permafrost and Perigl. Process.*, 7, 301-309.
- VONDER MÜHLL D., 1993 : *Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberengadins*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 122.
- VONDER MÜHLL D., HAUCK C., GUBLER H., McDONALD R. et RUSSILL N., 2001 : New Geophysical Methods of Investigating the Nature and Distribution of Mountain Permafrost with Special Reference to Radiometry Techniques. *Permafrost and Perigl. Process.*, 12/1, 27-38.
- VONDER MÜHLL D., KELLER F., IMHOF M., KRUMMENACHER B., MIHAJLOVIC D., DELALOYE R., GARDAZ J.-M., WENKER L., HOELZLE M. et KÄÄB A., 1999 : Permafrost – extension et aspects particuliers, *Atlas hydrologique de la Suisse*, planche 3.9.
- WAKONIGG H., 1996 : Unterkühlte Schutthalden. *Beiträge zur Permafrostforschung in Österreich*, Arbeiten aus dem Inst. f. Geogr. Karl-Franzens-Universität Graz, 33, 209-223.
- WEGMANN G., 1995 : *Permafrostvorkommen auf geringer Meereshöhe, eine Fallstudie im Brüeltobel (AI)*. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich.